CAPÍTULO I

1.1. Considerações iniciais

Fotogrametria e Sensoriamento remoto é uma ferramenta extremamente importante para compilação de cartas topográficas e mapas. Com o rápido desenvolvimento da tecnologia, produtos gerados por técnicas fotogramétricas têm sido cada vez mais requisitados no gerenciamento de dados geográficos para apoiar administradores públicos e privados, na sua tomada de decisão. Tal progresso se deve, principalmente, ao desenvolvimento de sensores de imageamento digital, sensores de posicionamento e navegação e de varredura laser tridimensional (3D). Atualmente, a rápida aquisição de informações geométricas e espectrais, bem como o armazenamento de dados em computadores com alta potência de processamento, viabiliza o fluxo de processamento sem o envolvimento de processos químicos e scanners fotogramétricos para revelação e digitalização de fotografias, respectivamente. Também reduz custos e falha humana, tornando-se uma das grandes vantagens em relação ao processo convencional.

Vale ressaltar que os avanços supracitados são devidamente estudados e tratados por uma organização não governamental denominada *The International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS). Tal organização foi fundada em 1910 por um conjunto de profissionais e especialistas americanos, conhecida como *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), que define a Fotogrametria e Sensoriamento Remoto como ciência e arte de registrar, medir e interpretar informações sobre os objetos contidos na superfície física, sem contato físico direto.

De uma forma geral, a energia eletromagnética é registrada, predominantemente, na forma de imagens fotográficas e produtos cartográficos, tais como, ortofotos, pontos tridimensionais, modelos digitais de terreno (MDT) e elevação (MDE), mapas e cartas topográficas, são compilados através de processos fotogramétricos. Tais processos são, basicamente, divididos em três etapas, isto é, a calibração da câmera e a recuperação dos parâmetros de orientação interior e exterior das fotografias. A primeira etapa consiste em determinar os parâmetros de orientação interior da câmera (distância focal da câmera, coordenadas do ponto principal e distorções das lentes) e pode ser realizada periodicamente por meio de técnicas de calibração em serviço ou autocalibração de câmeras. A orientação interior das fotografias consiste em reconstruir os feixes de raios de luz e a orientação exterior se encarrega de recuperar os parâmetros de rotação e translação de cada uma das fotografias, no momento da exposição. Vale destacar que as etapas de orientação de imagens são realizadas por estações fotogramétricas digitais, de forma semiautomática ou automática.

Esta apostila introduz os conceitos e definições de Fotogrametria e Sensoriamento remoto ao leitor leigo. Vale ressaltar que os significados de fotografia e imagem serão tratados como sinônimos. No primeiro capítulo serão apresentados os aspectos históricos, o tratamento da energia eletromagnética e o funcionamento de sensores CCDs (*Charge Coupled Devices*). No segundo capítulo serão tratados os assuntos sobre os elementos fotogramétricos, geometria das imagens, definição dos sistemas de coordenadas de imagem e fiducial, escala fotográfica, sobreposição longitudinal e lateral, sensores fotogramétricos e espaciais. O terceiro capítulo apresenta os sistemas de imageamento mais atuais e usados em Fotogrametria e Sensoriamento remoto. Por fim, o quarto e últimos

capítulos definem os conceitos de estereoscopia e paralaxe, os processos de visualização estereoscópio entre outros elementos.

1.2. Darwinismo da Fotogrametria

Ao descrever o processo de projeção óptica de imagens, o filósofo Aristóteles (350 a.c) foi o primeiro a contribuir com o desenvolvimento da Fotogrametria. Por volta de 1500 d.c, Leonardo da Vinci desenhou o primeiro sistema para fins aéreos e também descreveu o processo da câmera escura. Entretanto, devido às limitações tecnológicas, suas invenções tiveram que esperar. Somente em 1783 o primeiro balão a ar foi materialmente concebido pelos irmãos Montgolfiers. No início do século XVIII o Dr. Brook Taylor publicou um tratado sobre a perspectiva linear e mais tarde J. H. Lambert sugeriu que o princípio de perspectiva poderia ser utilizado na compilação de mapas.

A prática atual da Fotogrametria não poderia ocorrer até o desenvolvimento do processo fotográfico. O fato ocorreu em 1839 na cidade de Paris, quando Louis Daguerre anunciou o processo fotográfico direto. Neste processo a exposição foi realizada em uma placa de metal sensibilizada pela luz, com uma porção de iodeto de prata, dando origem ao processo fotográfico dos dias atuais.

Alguns anos após a invenção de Daguerre, um geodesista da Academia Francesa, demonstrou que o uso de fotografias era viável no mapeamento topográfico. Tal fato ocorreu em 1849 sob o comando do Coronel Aimé Laussedat do corpo de engenheiros do exército francês. Durante vários anos o Coronel Laussedat investiu seu conhecimento e sua persistência no desenvolvimento da prática da Fotogrametria aérea, com o uso de balões. Porém, devido às dificuldades encontradas migrou seus estudos para a prática da Fotogrametria terrestre. Em 1859 o Coronel

Laussedat apresentou os resultados de seu trabalho e foi considerado o pai da Fotogrametria.

Devido ao progresso feito no campo da aviação, a aeronave se tornou uma plataforma bastante útil para tomada de fotografias aéreas. A primeira fotografia aérea tomada de aeronaves foi adquirida em 1909, para fins de reconhecimento e estratégia bélica. Quatro anos após, o primeiro mapa foi compilado por meio de técnicas fotogramétricas. A partir de 1915 as primeiras câmeras com sistema cíclico para tomada de fotografias em série foram desenvolvidas por Oskar Messer (Albertz, 1999). Tal sistema era capaz de produzir fotografias na escala 1:10000 cobrindo uma área de 400 km^2, obtidas à uma altitude de 3000. Também foram muito utilizadas durante a 1ª. Guerra Mundial e, logo em seguida, foram estabelecidas como meio para produção de mapas e cartas topográficas por companhias privadas. A partir de 1925 filmes coloridos passaram a ser, vagarosamente, introduzidos no processo e quadros focais de 10x15 cm tornaram-se o padrão de filmes fotográficos usados na compilação de produtos fotogramétricos.

Antes do início da 2ª. Guerra Mundial, o formato padrão dos filmes passou a ser 18x18 cm e filmes infravermelhos foram usados para propósitos de detecção de exército inimigo. No início do século XX o Dr. Carl Pulfrich iniciou experimentos com pares estereoscópicos de fotografias. A partir de seu trabalho foram desenvolvidos vários dos equipamentos restituidores, permitindo os processos de orientação de fotografias em equipamentos analógicos, tendo como principal foco a compilação de mapas e cartas topográficas de forma rápida e econômica, em escalas menores que 1:50000. Ainda nesta época, a produção de mapas era considerada uma tarefa árdua, morosa, propagadora de erros grosseiros e necessitava de operadores devidamente treinados.

Durante a década de 1970, com a introdução da tecnologia dos computadores, os processos manuais de compilação de mapas foram substituídos por tecnologia assistida por computador. Primeiramente foi dada atenção à integração dos métodos de ajustamento de observações às medidas fotogramétricas, aliando os modelos matemáticos e os algoritmos computacionais aos instrumentos ópticos-mecânicos, com a finalidade de relacionar as observações efetuadas no espaço imagem (fotografias) e no espaço objeto (superfície física), para as devidas tarefas de orientações e posteriores medidas a serem realizadas, principalmente no que concerne a fototriangulação de imagens. A partir desde momento, houve uma explosão no desenvolvimento de equipamentos destinados para tais finalidades.

O rápido e exorbitante desenvolvimento tecnológico projetou a Fotogrametria na era Digital, cooptando com técnicas de processamento de imagens, visão computacional e inteligência artificial, que por sua vez, possibilitaram a automação de algumas de suas tarefas, tais como, a orientação interior de imagens, a geração de MDT e a geração de ortofotos digitais. A automação dos processos fotogramétricos propicia o aumento da produtividade, melhoria da qualidade dos produtos, redução de tempo na execução das tarefas, *feedback* do processo produtivo, entre outros fatores.

Uma tecnologia emergente no mercado nacional é o emprego de câmeras digitais de grande formato construídas para fins cartográficos. A maturidade do desenvolvimento dessas câmeras permite aquisição de imagens na região do espectro eletromagnético do visível e infravermelho próximo com alto grau de resolução geométrica e radiométrica, aumentando o leque de aplicações e geração de novos produtos. Os sensores usados em câmeras digitais de grande formato podem ser do tipo *wiskbroom* (varreduda por quadro), proveniente do sistema ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*) lançado em 1972 para adquirir imagens da superfície física da Terra acoplado em sistemas orbitais, atualmente conhecido como

Landsat, *pushbroom* (varredura linear), implementado pela primeira vez no projeto METEOR-PRIRODA 5, sendo também usado no satélite SPOT-1 tornando-se o primeiro satélite a adquirir estéreo imagens, ou sensores matriciais (quadro a quadro).

A principal concepção para o desenvolvimento de câmeras digitais foi baseada na substituição do processo convencional de mapeamento para um processo totalmente digital. A gênese da ideia surgiu em uma dissertação na Universidade de New Brunswick, sendo logo em seguida patenteado o conceito de sistema de câmeras digitais *three line*. Os primeiros sistemas de câmeras digitais disponíveis no mercado foram apresentados no Congresso da ISPRS em 2000, pelas empresas Leica Geosystem (câmera digital ADS40) e Intergraph (câmera digital DMC). Uma das principais vantagens das câmeras digitais, quando comparada com câmeras métricas convencionais (baseada em rolo de filme), é a forma rápida e segura na aquisição das imagens, não sendo necessário uso de reveladores químicos e emprego de digitalizadores, para transformar as informações do meio analógico (papel) para o meio digital. Outras razões de significado econômico estão relacionados a capacidade de obtenção de imagens na região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, de forma simultânea.

Hoje em dia, uma das tecnologias mais empregadas em mapeamento de escalas grandes e médias é o sistema *laser scanning*. O princípio básico de funcionamento é baseado no cálculo do tempo de emissão e recepção do pulso laser emitido para determinar, juntamente com informações advindas dos sistemas de posicionamento e navegação, as coordenadas tridimensionais de objetos contidos na superfície física. O sistema pode ser operado no modo por pulsos ou ondas de fases e pode ser empregado em plataformas aéreas, terrestres ou embarcações marítimas.

1.3. Energia eletromagnética

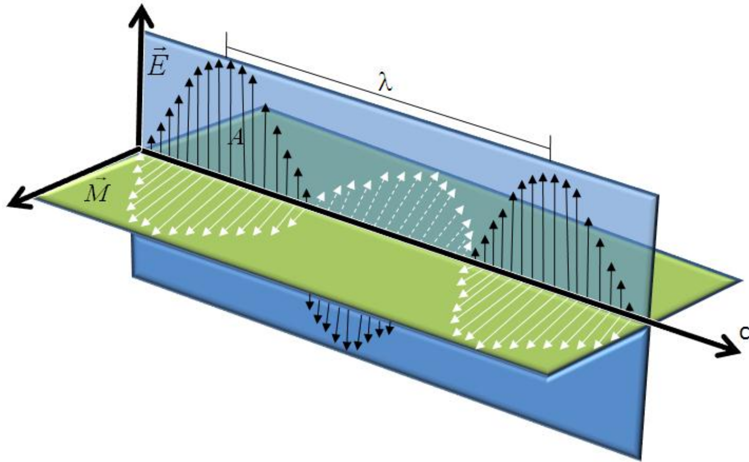
Segundo a ASPRS (1979) fotogrametria e sensoriamento remoto é arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos.

A informação a ser registrada, medida e interpretada pelos fotogrametristas é a energia proveniente de uma fonte natural ou artificial de radiação de energia eletromagnética (REM). O Sol é a fonte natural de REM mais conhecida. Já o *flash* de uma câmera fotográfica, por exemplo, é considerada uma fonte de energia artificial.

1.3.1. Energia radiante

Para melhor entender os conceitos que serão apresentados posteriormente é necessária uma noção básica de energia radiante. Todas as formas de energia radiante, que nada mais é que partículas de onda que compõem o espectro eletromagnético, percorrem o meio através de ondas (Fig. 1.1). Na física óptica um feixe de raio de luz se propaga no meio como uma linha reta. Na física quântica, de acordo com a teoria básica da onda, a energia radiante se propaga em forma de ondas, na velocidade da luz ($3x10^{-8}$ m/s), com um campo elétrico e outro magnético, ortogonais entre si com a mesma intensidade e repetitividade, num determinado tempo. Neste campo da física, tal energia é estudada como uma onda de luz com comprimento (λ), freqüência (f), amplitude (A) e velocidade (v) definida por um campo eletromagnético. A Figura 1.1. mostra o campo eletromagnético e seus elementos descritores.

Figura 1.1. Campo eletromagnético.



Na Figura 1.1 podem ser descriminados os elementos E (direção do campo elétrico), M (direção do campo magnético), c (velocidade da luz), A (amplitude da onda) e λ (comprimento de onda). De uma forma geral, existem 3 (três) medidas que descrevem as ondas eletromagnéticas, a saber:

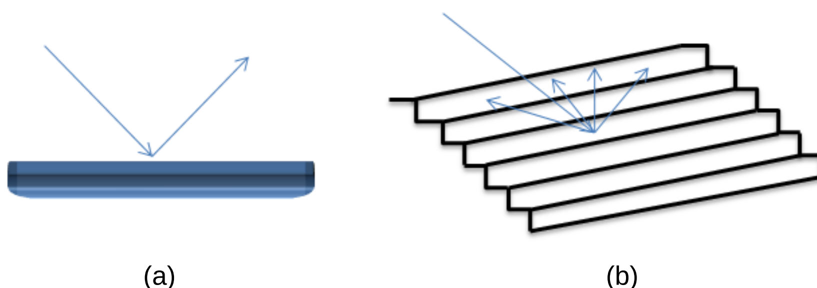
- **Comprimento de onda**: distância entre dois picos sucessivos de onda medida em micrômetros (μm);
- **Freqüência**: quantidades de picos de ondas que passam por um ponto fixo no espaço de uma unidade de tempo, medida em Hertz (*Hz*); e
- **Velocidade**: velocidade da luz, medida em metros por segundo ($m*s^{-1}$).

A capacidade de um objeto refletir energia eletromagnética depende do tipo de superfície, ao qual ocorre a interação. A energia

radiante emitida pelo Sol ao atingir a superfície física interage com os objetos presentes neste corpo e sofre as propriedades de reflexão, transmitância e absortância em variadas proporções quantitativas.

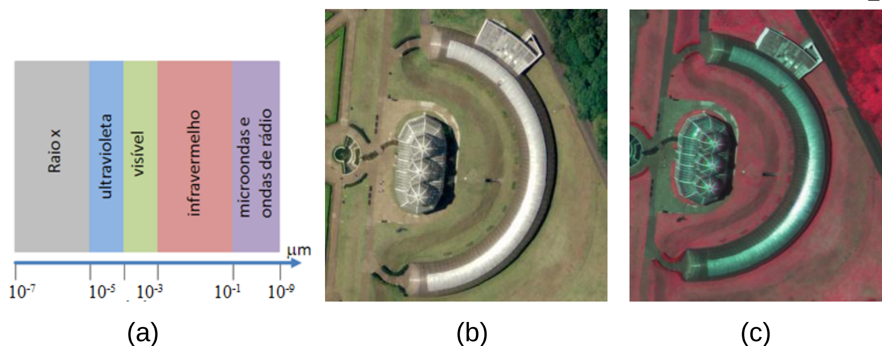
No caso de superfícies rugosas (Fig. 1.2b) a energia incidente é espalhada em vários ângulos. As superfícies especulares, tais como, corpos d'água, espelhos, áreas desérticas etc, provocam um espalhamento total da energia incidente e com o mesmo ângulo de incidência (Fig. 1.2a).

Figura 1.2. (a) Superfície especular. (b) Superfície rugosa.



Os filmes fotográficos e os sensores digitais (por exemplo, o CCD) são sensíveis ao comprimento de onda refletido pelos objetos, que corresponde à faixa espectral da luz visível e infravermelho próximo (visível: 0,3-0,7μm; infravermelho: 0,8-1,0μm). A Figura 1.3 apresenta o espectro eletromagnético.

Figura 1.3. (a) Espectro eletromagnético. (b) Porção de uma imagem colorida correspondente ao comprimento de onda na faixa do visível. (c) Porção de uma imagem infravermelha correspondente ao comprimento de onda na faixa do infravermelho próximo. (Cortesia: Esteio Aerolevantamentos)



(a) (b) (c)

De acordo com Max Planck, a energia radiante se transfere entre os corpos em quantidades fixas, isto é, o corpo não irradia energia de maneira contínua, mas por meio de pulsos. Assim, quando um átomo é atingido pela energia eletromagnética ocorre uma alteração do seu estado. A energia então é absorvida pelo átomo provocando um efeito conhecido como salto quântico, ou seja, é um salto energético de um elétron do átomo.

Segundo Planck, a energia transportada por fóton (energia necessária para provocar o salto energético de um elétron) é dada por:

$$En = hs * fr \qquad (1.1)$$

Onde,

- En : energia em Joules [J.s];
- hs : constante de Planck determinada em $6{,}6 \times 10^{-34}$[J.s];
- fr : freqüência [Hz]

Considerando o exposto acima, pode ser determinada uma relação entre freqüência e comprimento de onda, a saber:

$$fr = \frac{c}{\lambda} \tag{1.2}$$

Substituindo a Equação (1.2) na Equação (1.1) tem-se que:

$$En = hs * \frac{c}{\lambda} \tag{1.3}$$

O que corresponde a dizer que quanto menor o comprimento de onda maior a quantidade de energia liberada e vice-versa. A ideia proporcionou o prêmio Nobel ao ilustre físico e pensador Max Planck e tem colaborado efetivamente no desenvolvimento científico em várias áreas do conhecimento. Apesar do comprimento de onda possuir uma relação inversamente proporcional à freqüência, por razões de customização o comprimento de onda é a medida mais usual.

Na fotogrametria e sensoriamento remoto, a energia radiante geralmente é registrada em sensores analógicos (câmeras fotográficas convencionais) e sensores digitais (por exemplo, câmeras digitais). O processo de gravação e registro das informações em câmeras convencionais é realizado por um processo denominado de emulsão fotográfica e nos sensores digitais por meio de um dispositivo de carga acoplada, cujas características serão apresentadas a seguir.

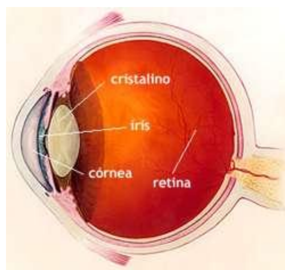
1.4. Gravação e registro da energia eletromagnética

O processo de gravação de informações, por meio de câmeras fotográficas, consiste no registro rápido e indireto dos objetos presentes na

superfície física. Os tipos de informações registradas pelos sensores são os que seguem: geométrica; radiométrica; semântica; e temporal.

Uma câmera fotográfica analógica contém os seguintes componentes básicos: 01 sistema de lentes, 01 obturador, distância focal (*f*) e o filme que permite gravar a energia eletromagnética incidente sobre o sistema de lentes da câmera. O processo de gravação e registro da energia eletromagnética parte do mesmo princípio de funcionamento do sistema visual humano. A Figura 1.4 mostra uma ilustração dos elementos que compõem o olho humano.

Figura 1.4. Olho humano e seus elementos básicos.



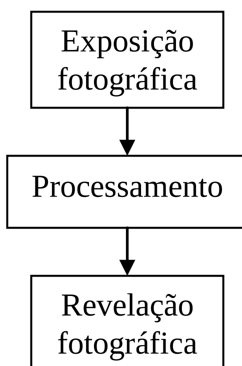
Ao fazer uma analogia simples entre o processo de gravação da energia eletromagnética de uma câmera fotográfica e o olho humano podemos concluir que o sistema de lentes de uma câmera tem a mesma funcionalidade que a córnea do olho humano, assim como a distância focal tem o mesmo princípio de funcionamento do cristalino, o obturador funciona como a íris, isto é, controla a quantidade de luz que incide sobre o filme fotográfico ou o sensor CCD, que admitem a mesma função da retina ocular.

Atualmente, no processo de gravação e registro da energia eletromagnética o sistema sensor mais utilizado em aplicações

fotogramétricas é baseado em dispositivos de carga acoplada, conhecidos como CCD de varredura linear ou quadro e CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semicondutor*). Porém, ainda são utilizadas câmeras métricas convencionais de precisão cartográfica baseadas na emulsão de papel fotográfico. Por isso, aqui será dada uma visão geral do processo fotográfico considerando o conhecimento sobre exposição, processamento e revelação das emulsões fotográficas.

Basicamente, o processo fotográfico segue os passos apresentados na Figura 1.5.

Figura 1.5. Passos do processo fotográfico.

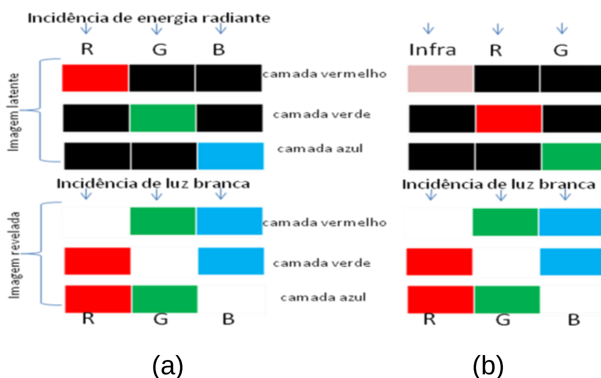


Na Figura 1.5, a exposição fotográfica é definida como a quantidade de energia radiante incidente sobre o sistema de lentes da câmera, que permite a emulsão fotográfica para um determinado tempo de exposição da luz. A exposição fotográfica está em função da abertura do diafragma do sistema de lentes da câmera e o tempo de exposição à luz. Como, atualmente, a maioria dos filmes fotográficos são coloridos, na fase de processamento fotográfico será apresentada uma visão geral de alguns

elementos básicos para melhor entendimento. A Figura 1.6 ilustra o conceito de filmes coloridos e falsa cor.

Figura 1.6. (a) Filme colorido. (b) Filme falsa cor.

Fonte: Adaptado de Schenk, 2005.



(a) (b)

O filme colorido é sensível as irradiações do espectro eletromagnético correspondente a região do visível. A primeira camada em contato com a radiação eletromagnética é o vermelho (R-*RED*), a camada mediana é o verde (G-*Green*) e a terceira camada é o azul (B-*BLUE*). De acordo com a Figura 1.6a, durante a exposição do filme fotográfico a luz branca incide sobre o filme fotográfico e a porção da luz correspondente ao vermelho é absorvida pela camada do filtro vermelho, sendo transmitidas as porções correspondentes a luz verde e azul. Na segunda camada (filtro verde) a porção da luz correspondente ao verde é absorvida, sendo transmitidas as porções correspondentes a luz vermelha e azul. E finalmente, na terceira camada (filtro azul) a porção da luz correspondente ao azul é absorvida e as componentes vermelha e verde da luz são transmitidas.

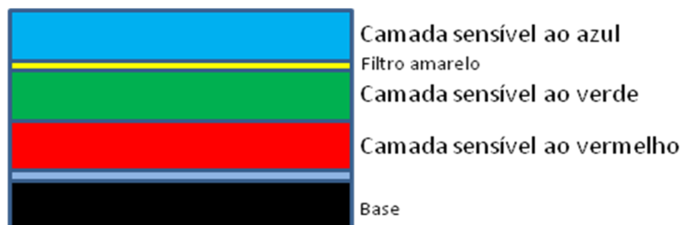
Na revelação fotográfica a situação é inversa, ou seja, a camada R torna-se transparente à luz vermelha sua camada é vista como ciano, no caso da camada G a mesma torna-se magenta devido ao processo de subtração da cor branca com a verde e a camada B muda para amarelo. Se o processamento fotográfico é visualizado sobre luz branca, as cores originais aparecerão. Neste caso, pode-se concluir que o uso de filtros é essencial para absorção de luz em alguns comprimentos de onda, por exemplo, o filtro amarelo absorve a luz azul do céu de forma a prevenir atenuações provocadas pelos efeitos da atmosfera.

No caso de filmes falsa cor, como pode ser visualizada na Figura 1.6b, a primeira camada corresponde ao infravermelho (IR-*Infrared*), a segunda camada ao vermelho e a terceira camada o verde. Com o processamento fotográfico o R corresponde ao IR, o G ao R e o B ao G, cuja explicação é dada o nome falsa cor e neste caso, como a vegetação reflete demasiadamente o IR, florestas e árvores aparecem com cor vermelha nas imagens.

Na Figura 1.5, a terceira etapa básica do processo fotográfico consiste no processo de revelação fotográfica, cuja tarefa demanda o uso de material químico e laboratório específico de alto custo. Para um filme pancromático (Preto e Branco) o material fotográfico é composto por 3 níveis, isto é, a base, a emulsão fotográfica e um nível de antihalo. A base pode ser feita de vários materiais (vidro, acetato, poliéster etc) e é quem fornece o suporte da emulsão. O nível antihalo é uma camada que impede a reflexão interna do feixe de raios de luz incidentes na base, de forma que não sejam produzidas imagens “fantasmas” na emulsão. Já a emulsão é composta por gelatina com cristais de haleto de prata suspensos, fazendo com que sejam quebradas as ligações do haleto de prata quando a energia luminosa atinge o cristal de prata suspenso nesta camada. Desta forma, o processo de revelação fotográfica permite a visualização da imagem latente

formada pelo conjunto de cristais expostos à luz. A Figura 1.7 ilustra a visão de uma seção transversal de uma fotografia colorida.

Figura 1.7. Seção transversal de uma fotografia colorida. (Adaptado de Schenk, 2005)



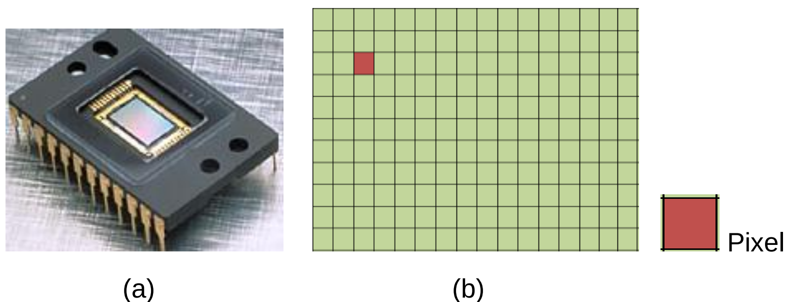
Um fator crítico da fotografia é a estabilidade geométrica da base do seu material. Como descrito anteriormente, vários são os materiais utilizados como base, porém, o mais eficiente e usado em aplicações fotogramétricas é base de poliéster, que fornece uma estabilidade de poucos micrômetros e, consequentemente, melhor resolução espacial, quando comparados com imagens adquiridas por câmeras digitais. As deformações do filme ocorrem durante o processamento fotográfico, que consiste de erros sistemáticos (facilmente determinados durante a orientação interior da fotografia) e erros aleatórios (não podem ser estimados devido sua flutuação probabilística).

1.4.1. Princípio de funcionamento do sensor CCD

As câmeras digitais têm sido muito utilizadas em aplicações fotogramétricas desde a década de 1970. O CCD foi o primeiro sensor linear desenvolvido contendo 96 pixels. Atualmente, existem sensores com mais de 50 milhões de pixels. O sensor CCD fornece alta estabilidade e por isso é preferido para uso em câmeras digitais. No processo de montagem

de uma câmera digital, o sensor é encaixado num substrato de cerâmica e coberto por um vidro, cujas dimensões mais usuais variam de ½ e 2/3 de polegadas com 2048x2048 pixels (*picture by elements*). A Figura 1.8 apresenta um sensor CCD e sua matriz de elementos sensores.

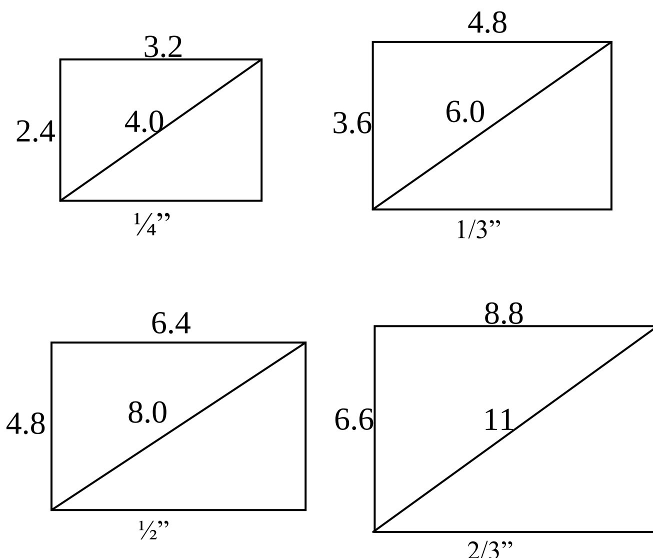
Figura 1.8. (a) Sensor CCD. (b) matriz de elementos sensores (pixels).



(a) (b)

Um sensor CCD é composto por um conjunto de pixels (ver Fig. 1.8b) que forma uma matriz bidimensional de elementos sensores (pixels) com espaçamento de poucos micrometros entre cada elemento sensor de dimensão inferior a 10 µm. O tamanho do sensor está relacionado com sua área ativa, sendo suas especificações determinadas pela dimensão diagonal em polegadas ou milímetros. A Figura 1.9 mostra diversos sensores e suas dimensões em polegadas e milímetros.

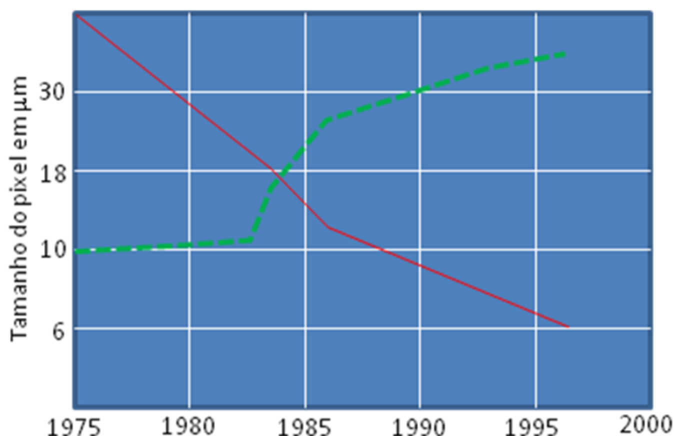
Figura 1.9. Dimensões padrão de um sensor CCD.



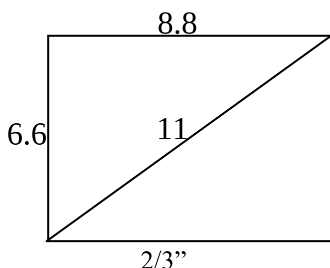
O tamanho do sensor define a resolução em contagem de pixels (resolução do pixel). Quanto maior o sensor maior a concentração de pixels por milímetro e, conseqüentemente, melhor será sua resolução espacial. Por exemplo, um sensor de 2/3” com 2560x1920 pixels (Coluna e Linha, respectivamente) terá 49.1520,00 pixels por milímetro e uma resolução de 3,45 µm por pixel no sensor. O formato do sinal utilizado nos sensores CCD são basicamente quatro, isto é, sinais compostos, Y-C, RGB e Digital. O sinal composto de vídeo pode seguir a norma EIA definida como RS-170 que define 30 quadros por segundo (em inglês, *Frames Per Second -FPS*), resolução de 640 x 480 pixels e sistema de cor NTSC (em inglês, *National Television Systems Commitee*) utilizado nos Estados Unidos ou a norma CCIR (em inglês, *Commité Consultatif International des Radiocommunications*), que define 25 quadros por segundo, resolução de 768 x 576 pixels e sistema de cor PAL, utilizado na Europa. A Figura 1.10

ilustra a relação existente entre o tamanho do sensor CCD e o tamanho do pixel ao longo dos anos.

Figura 1.10. Relação entre o tamanho do sensor CCD e o tamanho do pixel.



Sabe-se que um sensor CCD com 1/3”, cujas dimensões em x e y são 4,8x3,6 mm (tamanho físico do CCD), possui um pixel com resolução de 7,51 µm. Para calcular o tamanho do pixel de um sensor CCD 2/3”, cujas dimensões em x e y são 8,8x6,6 mm (diagonal física do sensor é de 11 mm), com 2560x1920 pixels (número total de colunas e linhas, respectivamente) basta fazer a seguinte relação, como segue:



$$Rp = \frac{x}{NTC} = \frac{y}{NTL}$$

Onde,

Rp : Tamanho do pixel;

x, y : Dimensões físicas do CCD;

NTC : Número total de colunas;

NTL : Número total de linhas.

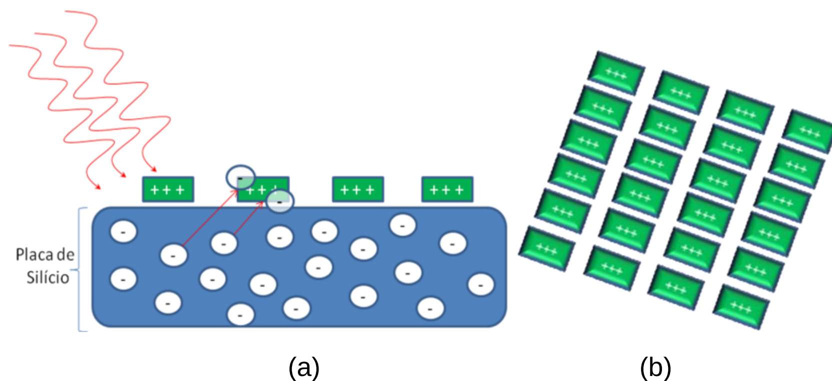
Neste caso, o tamanho do pixel é 3,4 µm comprovando a discussão anterior, isto é, quanto maior o sensor melhor sua resolução, pois 2/3” (tamanho do pixel de 3,4 µm) é maior que 1/3” (tamanho do pixel de 7,5 µm). Entretanto, sua resolução espacial é melhor. A seguir será descrito o princípio básico de funcionamento do sensor CCD.

Como descrito anteriormente, os sensores CCD são constituídos por uma superfície sólida sensível à luz, dotada de circuitos que além de registrar a energia eletromagnética incidente sobre o sistema de lentes da câmera digital permitem ler, eletronicamente, imagens digitais. Vale ressaltar que uma câmera digital com sensor de quadro CCD é formada por um conjunto de circuitos eletrônicos, um sistema de refrigeração e um suporte mecânico.

Um sensor CCD comum consiste num semicondutor formado por uma placa retangular de silício, onde é implantada uma rede de eletrodos ou capacitores (carga positiva) que capturam e analisam os elétrons (carga negativa) gerados na placa de silício pelo efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons por um material (o silício, no caso do CCD) quando exposto a radiação eletromagnética. Neste caso, quando uma quantidade de energia radiante superior incide sobre o material semicondutor (placa de silício) ocorre uma absorção de fótons e os elétrons livres abandonam suas órbitas por serem atraídos pelas cargas positivas

contidas nos capacitores. Os capacitores são dispostos em colunas de modo a cobrir todo o CCD (Figura 1.11b) e possuem a propriedade de manter ao seu redor os elétrons atraídos. O silício é a matéria prima básica para a construção de sensores CCD. A Figura 1.11 mostra um esquema simplificado do efeito fotoelétrico.

Figura 1.11. (a) Ilustração do efeito fotoelétrico. (b) Capacitores dispostos matricialmente no sensor CCD.

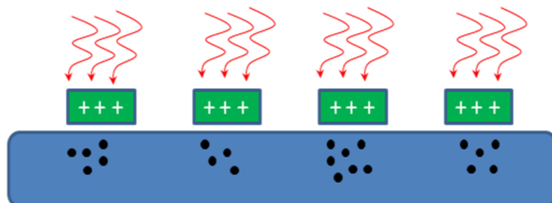


As diferentes colunas são isoladas entre si por um material que gera um potencial negativo permanente ao entrar em contato com a placa de silício, o que evita a contaminação entre colunas. As linhas de capacitores considerados perpendicularmente às colunas são designadas como filas. Cada capacitor é uma peça fundamental do detector CCD e corresponde a um elemento da imagem digital que será gerada, designado por pixel, cujo tamanho físico é variável.

O arranjo básico do efeito fotoelétrico é repetido várias vezes até que a energia eletromagnética não seja mais incidida sobre a placa de silício obtendo como informação cargas de energia acumulada (pontos pretos na

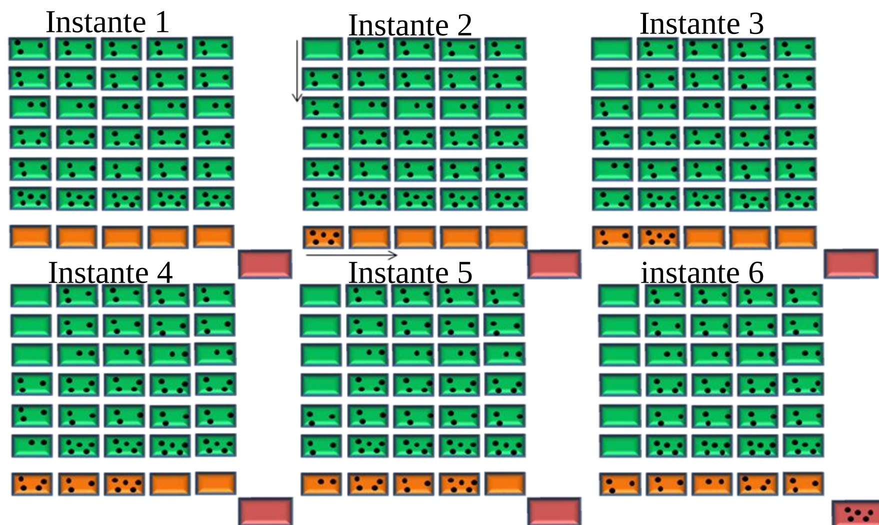
Figura 1.12), que é proporcional à energia radiante incidida sobre o capacitor. A Figura 1.12 ilustra o processo supracitado.

Figura 1.12. Captura e acumulação de luz no sensor CCD.

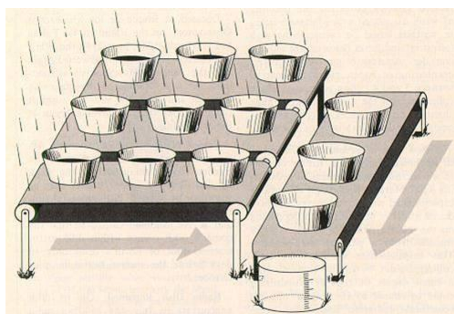


Ao final do processo de registro e gravação da energia eletromagnética a quantidade de energia acumulada (carga acumulada), proporcional à quantidade de energia armazenada em cada capacitor, deverá passar por um processo denominado transferência de carga acumulada. O princípio de transferência de carga acumulada é baseado na leitura das voltagens (sinais de potência) acumuladas em cada capacitor (pixel da imagem, Fig. 1.11b). A Figura 1.13 ilustra o processo de transferência de carga acumulada.

Figura 1.13. (a) CCD simplificado com 30 pixels e um registro de deslocamento e um amplificador de saída. (b) Analogia para fins de didática.



(a)



(b)

Na Figura 1.13a é ilustrado um CCD simplificado com 30 pixels, cada qual possui uma quantidade de carga acumulada (retângulos em verde), um registro de deslocamento (retângulo alaranjado) e um amplificador de saída

(retângulo vermelho). Após o registro da energia eletromagnética os potenciais de cada eletrodo são modificados e a carga é transferida de um eletrodo para outro verticalmente, como mostra a Figura 1.13a, até alcançar o registro de deslocamento. A partir deste, a carga acumulada é transferida horizontalmente, uma a uma, para um amplificador de saída, que posteriormente converte o sinal analógico (voltagem) em sinal digital, por meio de um conversor analógico digital. Ou seja, esta carga é convertida em uma tensão amplificada e posteriormente convertida para um valor digital, através do conversor analógico-digital (A/D) de modo que a câmera possa processar os valores da imagem (Figura 1.14).

Figura 1.14. Transformação A/D.

FONTE: Bockaesta, 2003.

Analógico →	Amostra	→ Digital
1,00 V -	- 255	→ 11111111
0,38 V -	- 98	→ 01100010
0,00 V -	- 0	→ 00000000

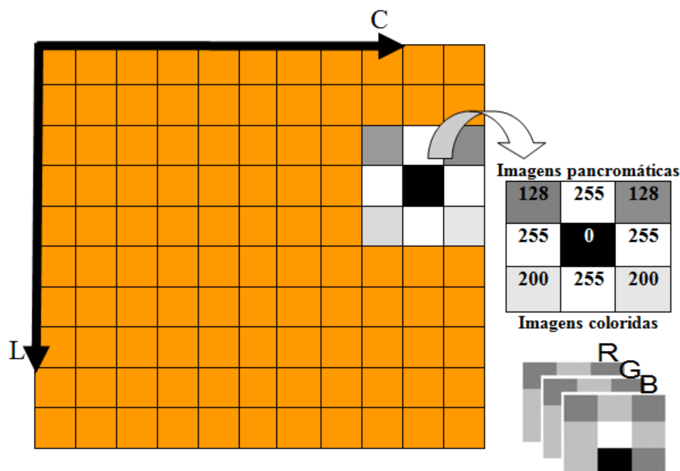
Os valores de intensidade do fluxo de radiação eletromagnética recebidos pelo sensor e transformados em voltagem são convertidos em número digital (NC), seguindo intervalos numéricos que variam de amplitude segundo 2^n, sendo n valores múltiplos de 2, que definem a resolução radiométrica do sensor.

Como analogia do processo supracitado, considere uma seqüência de baldes (baldes de carga) de água dispostos numa esteira rolante, cuja finalidade é armazenar a água da chuva (Fig. 1.13b). E ainda, outra seqüência de baldes (baldes de transferência) com a finalidade de receber a água da chuva armazenada anteriormente, que deverá descarregar a

quantidade de água acumulada num pluviômetro. Esta analogia pode ser feita para entendermos o funcionamento do processo de transferência de carga acumulada. Neste caso, cada balde de carga acumulada realiza a função dos pixels, enquanto cada balde de transferência realiza a função do registro de deslocamento e o pluviômetro a função do amplificador do sinal analógico. Após o sinal analógico ser convertido em digital é formado uma imagem ou fotografia digital. A Figura 1.15 ilustra um conjunto de elementos espacialmente ordenados numa imagem digital.

Como descrito anteriormente, uma imagem digital é um conjunto de elementos espacialmente ordenados em um arranjo matricial (Fig. 1.15a), cuja posição é dada por (Coluna-C, Linha-L) e para cada elemento de imagem (pixel) é associado um nível de cinza, expresso genericamente por $F(C,L)$, que são valores inteiros armazenados em "palavras" de n bits (dígitos binários), sendo que o número máximo de níveis de cinza que pode ocorrer na imagem é 2^n bits (GALO, 1993). Quanto maior o valor de *n* melhor a resolução radiométrica da imagem (ver Fig. 1.15b).

Figura 1.15. (a) Ilustração de uma imagem digital. (b) Resolução radiométrica de uma imagem.



(a)

Resolução de 9 bits (0-511)



Resolução de 10 bits (0-1023)



(b)

A resolução radiométrica é dada pelo número de valores digitais que representam os níveis de cinza na imagem, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. O número de níveis de cinza é dado em função do número de bits necessários para armazenar o valor do nível máximo, na forma digital. Por exemplo, se uma imagem de satélite possui

resolução radiométrica de 8 bits (2^3), significa um registro de imagens em 256 níveis de cinza.

Na Figura 1.15a, uma porção da imagem digital (3x3) mostra que os valores digitais (128, 255, 0, 200) expressam os níveis de cinza (cores preto, branco e cinza) contidos em cada posição da imagem. No caso de imagens ou fotografias coloridas, existe uma combinação das componentes RGB. Cada componente expressa um nível de cinza para cada posição correspondente na imagem. Na Figura 1.15b, verifica-se visualmente que quanto maior a resolução radiométrica da imagem maior o nível de detalhes que podem ser visualizados. Por exemplo, na imagem com resolução de 9 bits não é possível visualizar totalmente as feições cartográficas recobertas pela sombra. Porém, na imagem com resolução de 10 bits, as mesmas são perfeitamente visualizadas.

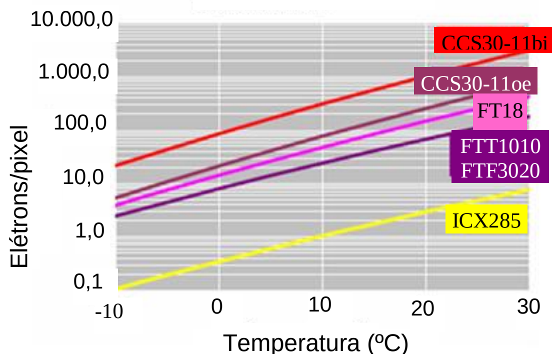
As imagens formadas por câmeras digitais são eivadas de ruídos (efeitos sistemáticos ou aleatórios que são provocados por defeitos na fabricação do sensor CCD ou deficiência na tecnologia dos CCDs). Os efeitos mais importantes são a corrente escura (*dark current*), a saturação (*blooming*), a mancha (*smear*) e a deformidade (*blemishes*). Todos estes efeitos resultam na degradação da qualidade da imagem. Trataremos aqui apenas do efeito da corrente escura.

1.4.1.1.1. Corrente escura (*Dark current*)

Durante o tempo de iteração da energia eletromagnética com o CCD, ocorre o acumulo da interferência térmica em cada elemento de imagem (pixel). Isto ocorre devido à necessidade do sensor CCD ser refrigerado a uma temperatura muito baixa para que o sinal seja reduzido a um nível negligenciável. O resultado da interferência provocada pelo mau resfriamento é conhecido como corrente escura, a qual interfere na

qualidade da imagem resultando em dois ruídos, isto é, o ruído de leitura e o ruído espacial (*THETA SYSTEM Elektronik GmbH*, 2004).

Figura 1.16. Diagrama da corrente escura de diferentes sensores CCD. Fonte: *THETA SYSTEM Elektronik GmbH* (2004).



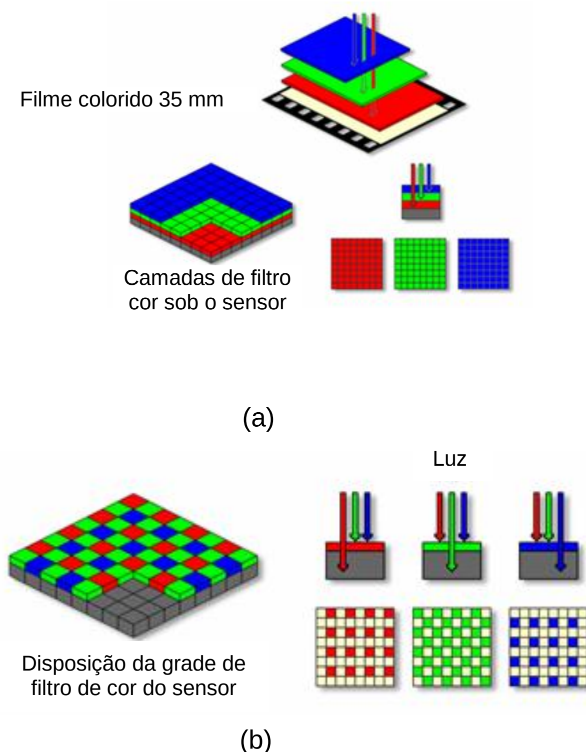
THETA SYSTEM Elektronik GmbH (2004) retrata que a corrente escura possui uma relação Temperatura x Elétrons/pixel quase exponencial como mostra a Figura 1.16. O ruído de leitura relaciona-se com as flutuações registradas durante o processo de leitura e uma maneira de correção consiste em efetuar uma média ou soma mediana de diversas imagens do mesmo objeto. Já o ruído espacial, está relacionado ao fato de cada elemento sensor reagir de modo distinto à corrente escura, produzindo um aspecto granulado na imagem, sendo habitualmente construído um mapa de referência pela soma media de 7 a 10 imagens obtidas em total obscuridade (RÉ, 2005).

1.4.1.1.2. Formação de cores em sensores CCD

De acordo com Bockaert (2003) a formação da cor nas câmeras digitais é baseada nos princípios do filme colorido. Para tanto, são

dispostas linearmente três películas (filtro) sobre o sensor CCD, que consistem em medir as cores fundamentais segundo as indicações no diagrama apresentado na Figura 1.17a.

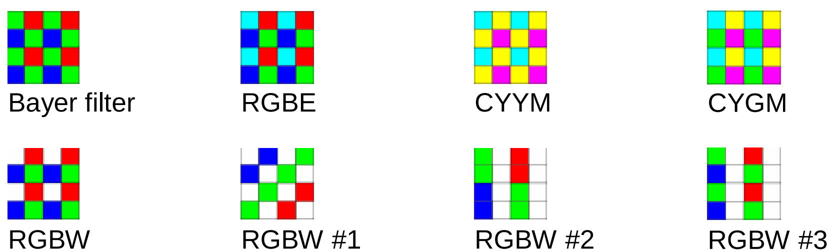
Figura 1.17. (a) Processo da formação da cor em meio analógico e digital. (b) Arranjo das corres do filtro de Bayer em um array de pixel em um sensor. FONTE: BOCKAESTA (2003).



Devido à estrutura do CCD, as películas não podem ser contínuas, assim, neste caso essa película é posta em forma de uma grade de filtro de cor sobre o CCD das câmeras fotográficas digitais para capturar as componentes do vermelho, verde, e azul da luz incidida sobre ele (Fig.

1.17b). Essa grade de filtro é denominada Filtro de Bayer (Bayer *filter*). Sendo um arranjo de filtros RGB que forma uma malha de quadros sobre o sensor, estando composta por 25% de vermelho, 25% de azul e 50% de verde (devido a saturação da luz ser maior nesta região), Como pode ser vista na Figura 1.18, essa grade possui várias composições, mas sempre mantendo o mesmo padrão de distribuição.

Figura 1.18. Lista de grade de filtro de cor utilizados no sensor CCD. FONTE: http://en.wikipedia.org/wiki/Color_filter_array>.



No caso de fotografias tomadas com câmeras métricas convencionais (Fig. 1.9a) são reveladas em papel fotográfico e, por isso, para o tratamento digital destas fotografias é necessário um processo de digitalização de fotografias via scanner fotogramétrico (Fig. 1.19b).

Figura 1.19. (a) Câmera métrica convencional. (b) Scanner fotogramétrico Leica DSW300.



(a)



(b)

Os scanners fotogramétricos são dispositivos utilizados para converter uma fotografia analógica (papel fotográfico) em uma imagem digital com precisão geométrica e radiométrica. Scanners fotogramétricos devem ser capazes de produzir imagens digitais com pixels na ordem de 5 a 15 μm e com resolução radiométrica maior que 10 bits. A qualidade geométrica de um scanner pode ser expressa pela acurácia posicional de um pixel na imagem resultante. As imagens digitais e dados gerados pelo scanner fotogramétrico podem ser utilizados tanto para processos de Fotogrametria Digital quanto para projetos em CAD e SIG. A seguir serão apresentadas algumas aplicações e produtos gerados com Fotogrametria.

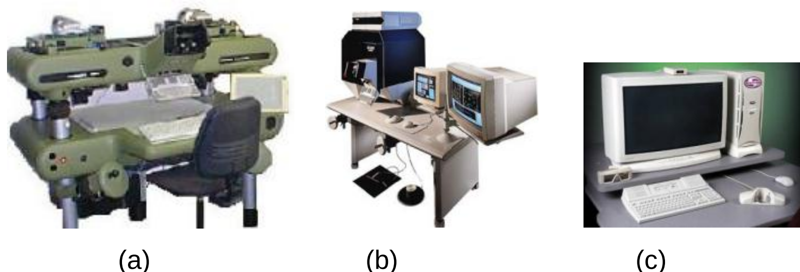
1.5. Algumas aplicações e produtos fotogramétricos

Uma das principais atividades da Fotogrametria é produzir mapas e cartas topográficas. Somente após o inicio da Fotogrametria foi possível a compilação de mapas topográficos em pequenas escalas (por exemplo, 1:50000, 1:100000 etc). As tarefas da Fotogrametria digital estão baseadas no uso de técnicas de processamento digital de imagens, tais com medida

automática de pontos, transformação de coordenadas, correlação de imagens e outras, para produzir ortofotos digitais com geometria cartograficamente compatível. Através de técnicas fotogramétricas é possível determinar o tamanho e forma de objetos, tornando os objetos imageados acessíveis às avaliações temáticas por meio de analises e interpretação para propósitos específicos e determinar o significado dos dados gravados através de avaliação semântica.

Quase todas as fases de projetos, locação, construção e gerenciamento são conduzidos, se não totalmente, em grande parte, pelos fotogrametristas. Para a realização de tais tarefas é necessário utilizar equipamentos apropriados, tais como, restituidores analógicos, analíticos ou sistemas fotogramétricos digitais (Fig. 1.20a, 1.20b, 1.20c, respectivamente). Atualmente, existe grande demanda pelo uso de sistemas fotogramétricos digitais devido ao seu baixo custo, rapidez no processamento dos dados, automação dos processos fotogramétricos, fácil interação homem/máquina, entre outros. A Figura 1.20 apresenta os equipamentos supracitados.

FIGURA 1.20. (a) Restituidor Analógico. (b) Restituidor Analítico. (c) Sistema fotogramétrico digital.



(a) (b) (c)

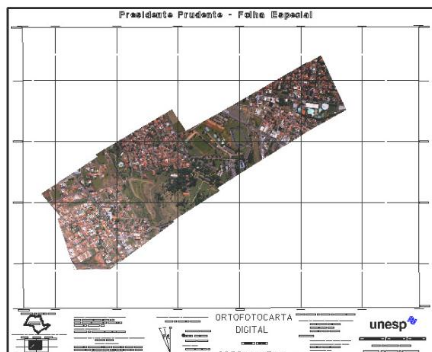
Com o surgimento do sistema *laser scanning* as empresas de Fotogrametria têm alcançado outras fatias do mercado nacional e internacional, tais como, projetos hidrográficos e rodoviários, ambientais, florestal, linhas de transmissão, gasodutos, oleodutos e outros que requeiram produtos cartográficos e que necessitem de informações tridimensionais com precisão e de rápida atualização.

As principais aplicações da Fotogrametria são: planejamento e projetos de autovias; planejamento urbano; cadastro urbano, rural e florestal; atualização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG); arqueologia; automação de processos industriais; mapeamento; realidade aumentada; classificação de imagens; robótica; medicina; odontologia; acidente e gerenciamento de tráfico; astronomia; extração de curvas de níveis e redes de drenagem; projetos de construção de pontes, túneis, barragens e dimensionamento dos respectivos deslocamentos de terras, e ainda, estudos de impacto ambiental como o cálculo de áreas alagadas na construção de hidroelétricas e o respectivo volume do reservatório; etc. Os produtos gerados pela Fotogrametria são:

- Fotografias aéreas, terrestres e espaciais;
- Mosaicos;
- Carta topográfica;
- Mapas geológicos,
- Modelo Digital do Terreno e de Superfície;
- Ortofotocarta;
- Entre outros.

Alguns produtos supracitados são apresentados na Figura 1.21.

FIGURA 1.21. (a) Ortofotocarta Digital. (b) Modelo Digital do Terreno.



(a)



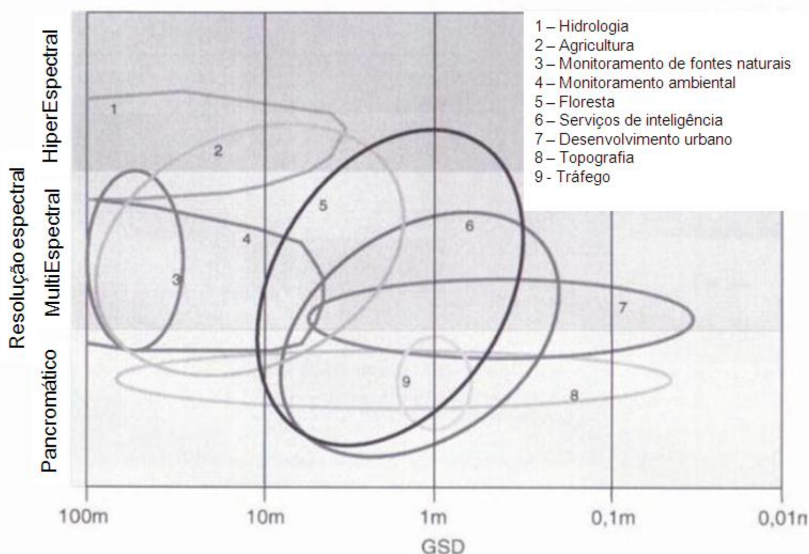
(b)

A ortofotocarta e o MDT são os produtos mais requisitados pelos usuários de Cartografia para apoiar tomada de decisões em projetos de Engenharia. Ortofotocarta é um conjunto de fotografias corrigidas da atitude da aeronave (ângulos de rotação da câmera), do deslocamento devido ao relevo e variação de escala, definidas num sistema de projeção cartográfica. O MDT é um conjunto de pontos tridimensionais regularmente ou irregularmente espaçados, geometricamente estruturados que representa numericamente os pontos e elevações contidos em uma área da superfície física.

De forma geral, a compilação de ortofotos digitais, retificação de imagens, medidas automáticas de pontos, correspondência de imagens, entre outras tarefas, são realizadas por técnicas fotogramétricas. Por isso, a fotogrametria é uma poderosa ferramenta para tomada de decisão, pois permite o registro da informação de forma rápida e dinâmica por meio de imagens e sem a necessidade do contato direto com o objeto a ser registrado.

Vale ressaltar que a resolução geométrica e radiométrica de uma imagem são parâmetros definidores da qualidade dos produtos supracitados. Em termos digitais a resolução geométrica também é chamada de GSD (*Ground Sample Distance*), que representa o tamanho de um pixel no terreno. A Figura 1.22 mostra as resoluções espectral e GSD requeridas para mapeamento topográfico e para demais aplicações (Roser et al., 2000).

FIGURA 1.22. Resolução espectral e resolução geométrica requerida em mapeamento (Adaptado de Roser et al. 2000).

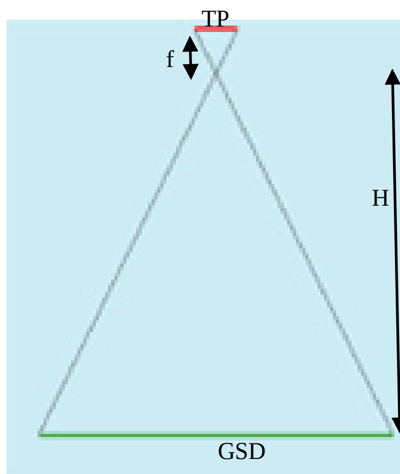


Na Figura 1.22 a resolução espectral é mostrada apenas em termos qualitativos. Enquanto a resolução geométrica é uma classificação bruta dos diferentes tipos de imagem e suas respectivas adequações para diversas tarefas, como segue:

- Imagens pancromáticas são úteis no reconhecimento e registro de estruturas da superfície física da Terra;
- Imagens multiespectrais são usadas para classificação a priori das propriedades químicas e biológicas da superfície física da Terra;
- Imagens hiperespectrais são usadas para identificação e reconhecimento refinado das propriedades geológicas, químicas e biofisiológicas da superfície física da Terra.

Para calcular o GSD é necessário considerar os seguintes elementos: o tamanho do pixel (Tp), a distância focal da câmera (f) e altura de voo (H). A princípio, vamos considerar que a distância focal da câmera é a distância entre o sensor e o centro óptico da câmera e a altura de voo é a distância entre o sensor e a superfície física da Terra, como mostra a Figura 1.23.

FIGURA 1.23. Cálculo do GSD.



Na Figura 1.23, por semelhança de triângulos tem-se:

$$\frac{GSD}{Tp} = \frac{H}{f} \tag{1.1}$$

Portanto, $GSD = \frac{Tp}{f} H$ (1.2)

Exercício (1.1)

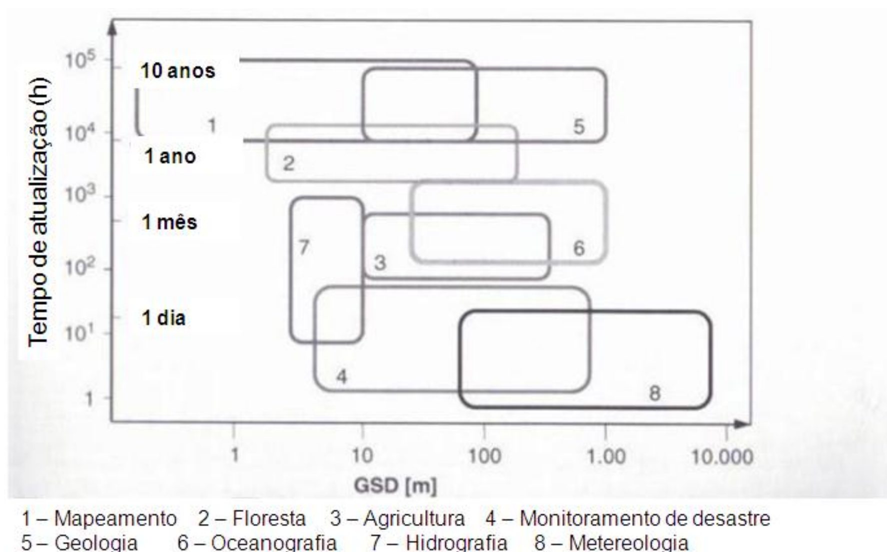
Dada uma câmera digital com 63 mm de distância focal, uma altura de voo de 965 m e o tamanho do pixel de 6,5 µm. Calcular o GSD.

Resolução:

$$GSD = \frac{0{,}0065mm}{63mm} 965m = 0{,}10\text{m}$$

Outro parâmetro bastante útil em aplicações que necessitam de monitoramento específico devido às mudanças de características da superfície física é a taxa de atualização. A Figura 1.23 mostra a taxa de atualização necessária para diversas aplicações.

FIGURA 1.23. Resolução geométrica e taxa de atualização requerida (Adaptado de Roser et al. 2000).



As Figuras 2.27 e 2.28 mostram que para mapeamento topográfico são requeridas resoluções geométricas de 5 cm – 50 m com taxa de atualização de 1 à 10 anos. A escala dos mapas associados para tal aplicação estão entre 1:500 – 1:500.000 (ver tabela 2.1).

TABELA 1.1. Relação entre GSD e escalas planimétricas.

GSD	Escala
5 cm	1:500
10 cm	1:1000
25 cm	1:2500
50 cm	1:5000
1 m	1:10.000
2,5 m	1:25.000
5 m	1:50.000
10 m	1:100.000
50 m	1:500.000

A resolução angular das câmeras digitais também influencia na precisão dos pontos determinados fotogrametricamente. Quanto maior o ângulo de abertura melhor a resolução da altimetria do ponto. No entanto, maior será o deslocamento radial dos objetos presentes na imagem. A Tabela 1.1 mostra as diferentes resoluções angulares requeridas para diversos tipos de aplicações.

TABELA 1.2. Resolução angular da câmera para diferentes aplicações.

Aplicação topográfica	Resolução angular
Terrenos planos e alta precisão altimétrica	30^0 - 60^0
Terrenos movimentados	20^0 - 40^0
Áreas montanhosas	10^0 - 25^0
Recursos naturais	30^0 - 50^0
Áreas suburbanas	20^0 - 40^0
Áreas urbanas	10^0 - 25^0

A diversidade de aplicações em Sensoriamento Remoto demandou a criação de novos filtros para atender requerimentos espectrais. Por exemplo, o canal do espectro na banda azul (460±30 nm) concentra baixa absorção de clorofila da vegetação verde na água ou na superfície. Este canal é extremamente importante para observar e detectar corpos de água. O canal do espectro na banda verde (560±25 nm) encontra-se na reflectância máxima da vegetação verde e também é usado para detectar clorofila em corpos d'água. A segunda banda de absorção de clorofila encontra-se na banda vermelha (635±25 nm). Já na banda do infravermelho próximo (860±25 nm) encontra-se o pico da curva da vegetação, onde juntamente com a banda vermelha propicia informações sobre o estado da vegetação (ver Figura .

FIGURA 1.24. Ilustração de curvas e bandas espectrais.

